第 41 卷 第 6 期
2024 年 12 月

应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 41 No. 6
Dec. 2024

文章编号:1000-4939(2024)06-1288-11

带顶底 L 型件的装配式梁柱节点参数分析

李晓蕾[1],李雪艳[1],李慎[1],刘珏[2]

(1. 西安理工大学土木建筑工程学院,710048 西安;2. 中国建筑西北设计研究院有限公司,710018 西安)

摘 要:提出了一种新型装配式梁柱节点形式,框架梁通过顶底 L 型件与框架柱相连,实现全螺栓装配化施工。前期对带顶底 L 型件的装配式梁柱节点足尺试件进行了拟静力试验研究,对该节点的抗震性能进行了分析,以试验研究为基础,通过 ABAQUS 有限元分析软件,进行该节点的参数拓展分析,分析该节点设计参数对带顶底 L 型件的装配式梁柱节点受力性能的影响。首先建立足尺试件的有限元分析模型,验证了有限元分析过程的精确性;然后考虑节点 L 型件形式、竖板/横板厚度、横板长度、加劲肋个数以及端板厚度变化对装配式连接节点的受力性能的影响,以期对带顶底 L 型件的装配式梁柱节点的设计和优化提供工程建议。

关键词:装配式梁柱节点;L 型连接件;参数分析;有限元分析

中图分类号:TU341 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2024.06.008

Parametric analysis of assembled beam-column joints with top and bottom L-shaped members

LI Xiaolei[1], LI Xueyan[1], LI Shen[1], LIU Jue[2]

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, 710048 Xi'an, China;
2. China Northwest Architecture Design and Research Institute Co., Ltd., 710018 Xi'an, China)

Abstract: A new type of assembled beam-column joint is proposed, in which the frame beam is connected to the frame column by means of a top-bottom L-shaped member to achieve fully bolted assembly construction. In this paper, based on the experimental study, the ABAQUS finite element analysis software is used to carry out an extended parametric analysis of this new type of assembled joint to study the effect of the joint design parameters on the force performance of the assembled beam-column joint with top-bottom L-shaped member. First, the finite element analysis model of the specimen was established to verify the accuracy of the finite element analysis process. Then the form of the L-shaped member of the joint, the thickness of the vertical plate of the L-shaped member, the thickness of the horizontal plate of the L-shaped member, and the length of the horizontal plate of the L-shaped member were considered. The results of the study are intended to provide engineering suggestions for the design and optimization of assembled beam-column joints with top and bottom L-shaped members.

Key words: assembled beam-column joint; L-shaped member; parametric analysis; finite element analysis

收稿日期:2022-02-24 **修回日期**:2022-10-23
基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(No. 2021JM-330;2022JM-220)
通信作者:李慎。E-mail:lishen2861@163.com
引用格式:李晓蕾,李雪艳,李慎,等. 带顶底 L 型件的装配式梁柱节点参数分析[J]. 应用力学学报,2024,41(6):1288-1298.
LI Xiaolei, LI Xueyan, LI Shen, et al. Parametric analysis of assembled beam-column joints with top and bottom L-shaped members[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2024, 41(6): 1288-1298.

钢框架结构具有延性和耗能优良的特性,其空间布置灵活,适用于多高层钢结构建筑体系。钢框架中的梁柱节点形式和构造是结构受力的关键部位,整体框架依靠节点进行传力。传统钢框架设计理念为梁柱节点刚性连接,如全焊连接或栓焊连接,保证钢框架结构具有足够的承载力和刚度,然而节点受力特性更多依赖于梁柱连接处的焊接质量。阪神地震和北岭地震震害调查发现,栓焊或全焊连接节点的钢框架发生脆性断裂,甚至倒塌,主要原因为焊接热影响造成节点区延性不足[1-3]。

如何在保证钢框架有足够的承载力、刚度的前提下,提高节点的转动能力,避免焊接影响,研究学者提出了传统刚性连接节点的解决思路,如半刚性节点、翼缘加强型节点、翼缘削弱型节点、腹板削弱型节点、节点配置耗能装置、可变梁高装配式节点、全螺栓拼接、Z 字型悬臂梁段等[4-22],其改进思路均为加强节点区域的承载能力,使得节点的塑性铰外移,避免在节点根部出现[23-25]。自"十三五"开始,国家大力倡导绿色装配式建筑,提出"装配化建造、工业化生产、标准化构件"的策略[26-27],钢结构自身具有装配化的优势,受到研究学者的广泛关注和青睐,提出了钢框架梁柱节点的装配式连接方案[28-29]。本研究提出了带顶底 L 型件的装配式梁柱节点,基于前期试验研究[30],进行了节点关键参数的敏感性分析。

1　试验验证

1.1　模型建立

试件设计为边框架梁柱节点,采用足尺试件,框架梁长度为 1 600 mm,框架柱长度为 2 216 mm,梁截面为 HN400 × 200 × 8 × 13,柱截面为 HW400 × 400 × 13 × 21,节点试件共 3 个,其编号为 LJD-1、LJD-2、LJD-3,变化参数为 L 型件厚度和长肢长度。框架柱和框架梁通过 10.9 级 M20 的高强螺栓实现全螺栓装配,栓孔直径为 21.5 mm。试件的装配图和构造见图 1,节点试件的设计参数见表 1。试件加载采用梁端加载方式(图 2),框架柱横放,一端铰接,一端通过千斤顶施加柱轴压力。首先在柱顶施加 1 000 kN的轴向荷载(按轴压比 0.2 计算),再在梁端施加水平荷载,水平荷载参考美国规范 AISC/ANSI314-10,以梁端转角作为控制参数进行加载,加载制度见图 3。

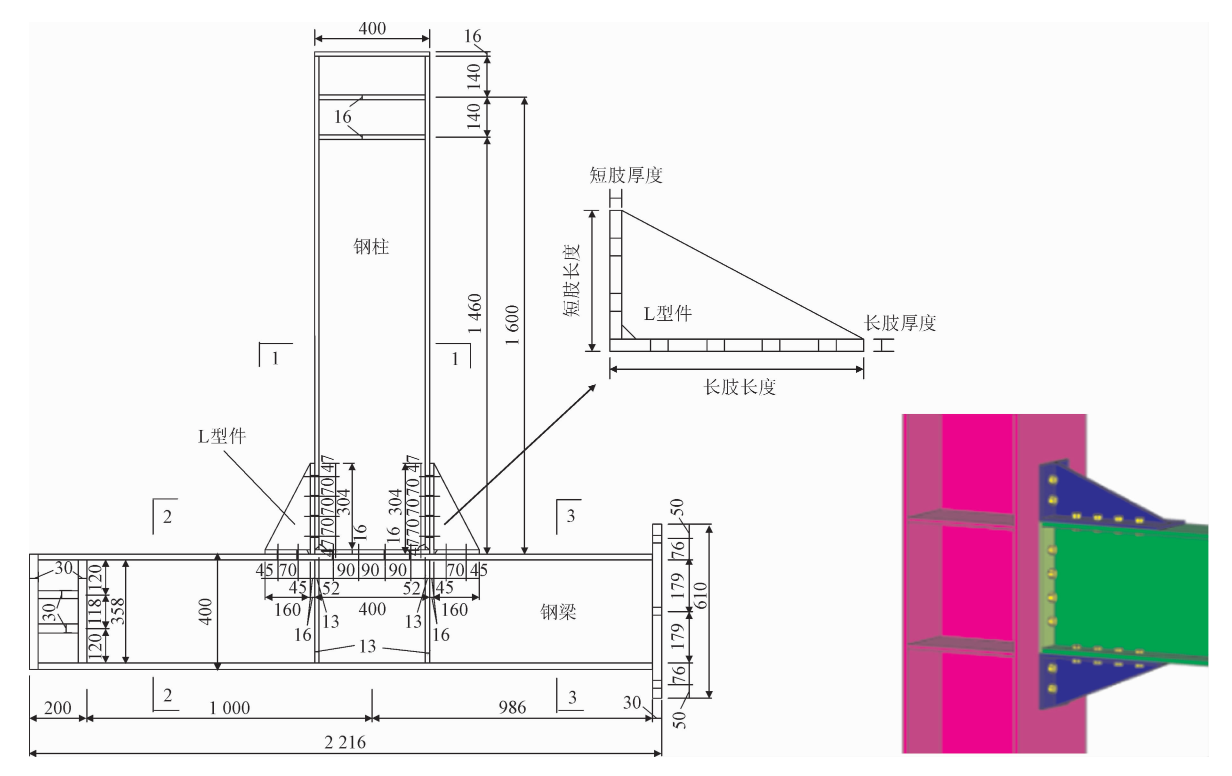


图 1　试件构造形式

Fig. 1　Construction features of specimens

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Design parameters of specimens

试件编号	L 型件长肢长度/mm	L 型件厚度/mm
LJD-1	320	16
LJD-2	420	16
LJD-3	420	20

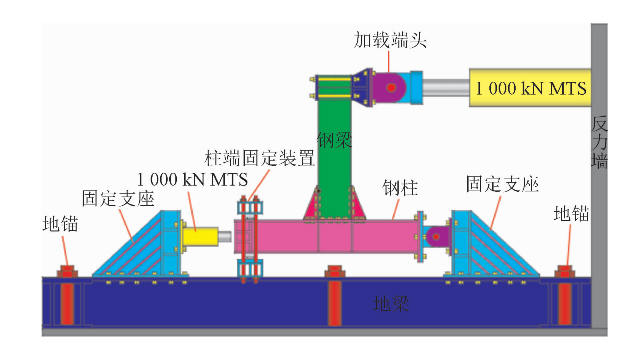


图 2 试件加载装置

Fig. 2 Test setup

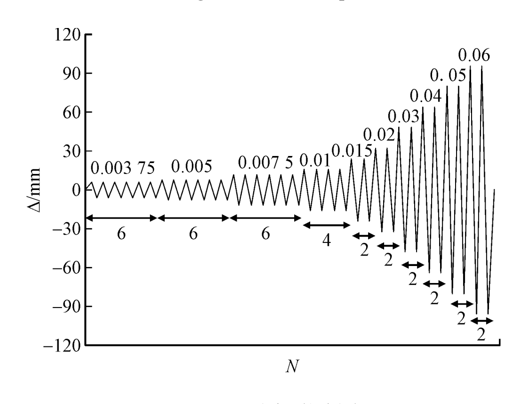


图 3 试验加载制度

Fig. 3 Loading protocol

本研究采用 ABAQUS 建立带顶底 L 型件的装配式梁柱节点,采用实体单元建模,选择线性缩减积分单元(C3D8R)。试验为梁端加载方式,有限元边界条件同试验,见图 4。节点柱端平面位于 XOZ 平面内,柱端限制 X、Y、Z 方向的平动自由度,模拟柱端铰接。梁端部分翼缘平面整体进行 Y 方向耦合,外力以施加位移的方式施加于耦合面的主节点上。在梁端 200 mm 范围内设置水平约束 $U_x=0$,防止加载时钢梁出现平面外失稳。按试验加载制度来模拟试件加载,在初始分析步施加整个模型的边界条件和接触,模型加载前,先后施加高强螺栓预紧力和梁端水平位移,按照位移控制对模型进行加载。网格划分在节点受力复杂的区域进行局部加密(图 5)。钢材强化模型包括等向强化、随动强化与混合强化,研究采用双线性随动强化模型,从而考虑了循环加载下的包辛格效应。此外,为考虑钢材的累计损伤退化,在设置钢材的材料属性时,加入延性损伤,同时定义钢材的损伤演化路径。钢材材性参数均取自材性试验,屈服准则采用 Von Mises 准则与关联流动法则。焊接部位在模型中均设置为 Tie,焊缝近似与母材等强焊接。高强螺栓的螺母与螺帽同板件之间的约束设置为 Tie,便于模型收敛计算;为防止加载点处应力集中,在加载面上设置 Coupling 约束;螺杆与孔壁之间的接触面处设置无摩擦的硬接触属性,并允许接触后分离,即不考虑接触面的摩擦,两接触面受压刚度无穷大,受拉刚度为 0,板件之间接触摩擦系数取为 0.4。

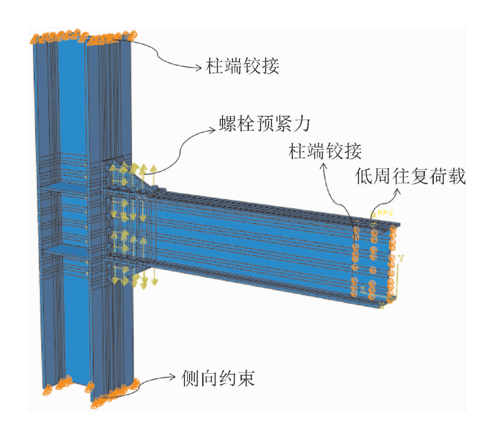


图 4 模型边界条件

Fig. 4 Boundary conditions

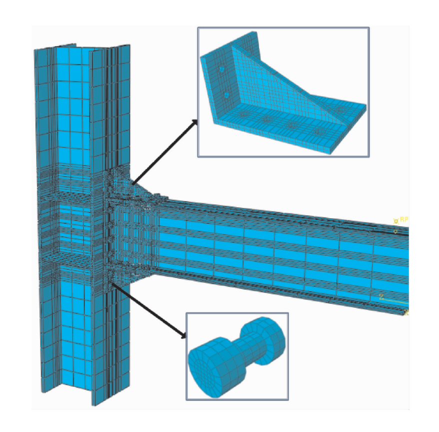


图 5 网格划分

Fig. 5 Grid division

1.2 破坏模式对比

选取试件 LJD-1 的试验破坏模式与有限元进行对比(图 6),图中有限元分析结果为 Von Mises 应力云图。有限元分析中试件的顶底 L 型件变形与试验保持一致,其中 L 型件短肢趾尖中部均微微拱起,与梁翼缘相连的 L 型件长肢趾尖均与梁翼缘出现轻微

分离现象。有限元中试件梁腹板及梁翼缘上的应力最大处出现在节点核心区以外、L 型件长肢最外排螺栓处,而试验结果中对应的试验现象为梁腹板鼓曲,梁翼缘撕裂至梁腹板中部及梁翼缘屈曲。有限元分析所得构件的受力破坏形态与试验结果基本一致,从而使有限元分析的可靠性得到了初步验证。



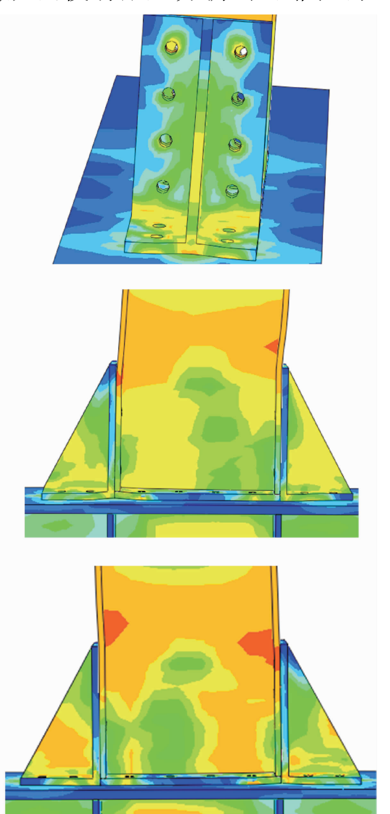



图 6　试件 LJD-1 有限元分析分析与试验结果破坏模式对比

Fig. 6　Failure model between FEA analysis and test results of LJD-1

1.3　滞回曲线对比

有限元计算滞回曲线与试验滞回曲线对比见图 7。由图 7 分析得:试验滞回曲线正负方向出现不对称的循环圈,是因为加载到大位移时,试件出现的平面外扭曲导致承载力下降,试验终止,没有进行另外反向半圈的滞回加载导致的。

有限元模型忽略了实际试件的几何缺陷、初始构造缺陷以及残余应力等因素的影响,有限元模拟中钢材采用本构关系为双线性随动强化模型,有限元模型的滞回曲线比试验的滞回曲线更加平滑饱满,正负加载方向的对称性更好,试件塑性发展相对较为充分,计算结果相对较好。正向荷载模拟值高于试验值,这是由于在正向位移加载时,试件的钢梁翼缘出现不同程度的翘曲失稳,导致位移测量误差大,从而正向承载力低于负向承载力。而负向峰值点处的荷载几乎重合,再一次验证了试验结果的准确性。

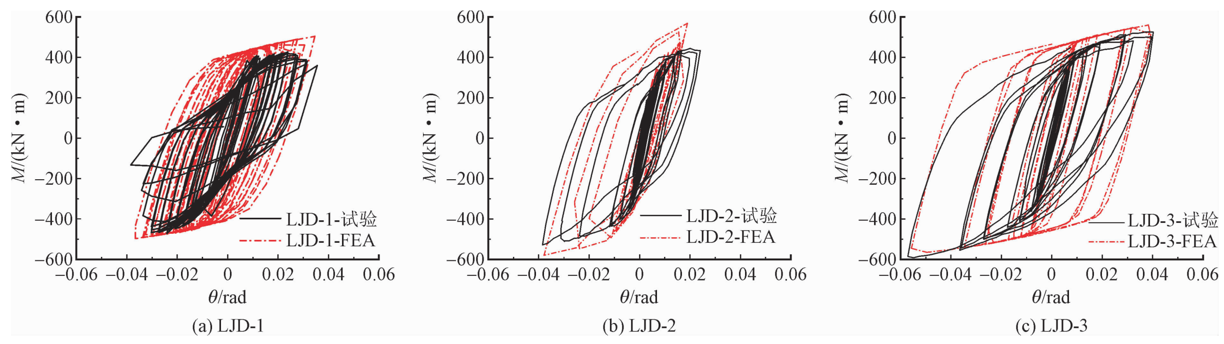


图 7　滞回曲线对比

Fig. 7　Hysteresis curve comparison

1.4 骨架曲线对比

有限元分析所得骨架曲线和试验结果对比见图8。弹性阶段,二者骨架曲线基本重合,当节点屈服后,二者逐渐偏离,但总体走势大致吻合。有限元模拟较试验有更好的对称性,由于试验加载时侧向支撑对试件的面外约束不能彻底达成对称,加载时如果有面外失稳,则不对称会明显。其中 LJD-1 试件负向加载后期承载力相差很大的原因是该节点梁翼缘的 L 型件长肢最外排螺栓位置发生撕裂现象,导致梁腹板及翼缘螺栓孔处出现贯通裂缝,承载力急剧下降,而有限元分析中无法体现此种破坏。

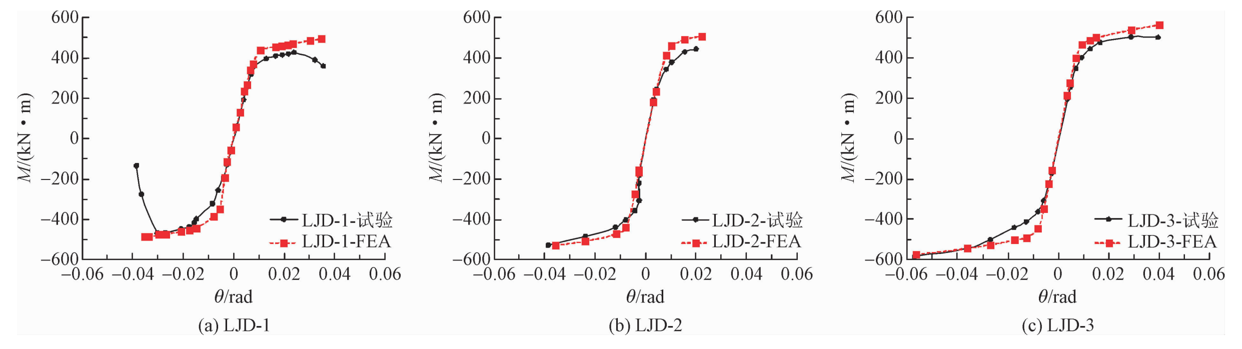


图 8 试件骨架曲线对比

Fig. 8 Comparison of specimen skeleton curves

2 参数分析

2.1 参数设置

在模型验证试验的基础上,对带顶底 L 型件连接的装配式连接节点进一步参数分析。由于梁柱节点的节点核心区受力状态比较复杂,节点的力学性能会受诸多因素影响,为研究此类新型节点在相关构造参数作用下力学性能的变化规律,在基本(Base)试件基础上设计出 6 组有限元试件。经过机上模拟试验,得到各试件的弯矩-转角关系曲线,获取不同参数影响下试件的屈服承载力、极限承载力及节点转动刚度,通过对比发现此新型节点的力学性能随着不同构造参数变化的发展规律,参数分析见表 2。

表 2 试件设计参数

Tab. 2 Design parameters of specimens

变化参数	试件编号		
	LPF-1(Base)	LPF-2	LPF-3
L 型件竖板长度/mm	176	250	250
L 型件横板长度/mm	250	250	176

变化参数	试件编号			
	LST-1	LST-2	LST-3(Base)	LST-4
L 型件竖板厚度/mm	10	13	16	21

变化参数	试件编号			
	LHT-1	LHT-2	LHT-3(Base)	LHT-4
L 型件横板厚度/mm	10	13	16	21

变化参数	试件编号			
	LHL-1(Base)	LHL-2	LHL-3	LHL-4
L 型件横板长度/mm	250	320	370	420
螺栓个数	6	8	8	8
螺栓栓距(边距)/mm	70(47)	70(47)	80(57)	90(67)

变化参数	试件编号			
	LEP-1	LEP-2	LEP-3(Base)	LEP-4
端板厚度/mm	10	13	16	21

变化参数	试件编号		
	LSS-1	LSS-2(Base)	LSS-3
L 型件加劲肋个数	0	1	2

变化参数设计如下,L 型件记为 LPF 系列,其中 LPF-1 为 Base 试件,L 型件横板长 250 mm,竖板长 176 mm,板厚为 16 mm,加劲肋形式为单加劲。L 型件竖板厚度记为 LST 系列试件,L 型件横板厚度记为 LHT 系列试件,L 型件横板长度记为 LHL 系列试件,端板厚度记为 LEP 系列试件,L 型件加劲肋个数记为 LSS 系列。

2.2　弯矩-转角曲线

图 9 给出了各个参数变化时,节点的弯矩-转角曲线。LPF 系列试件在加载初期,均处于弹性阶段,弯矩-转角曲线发展大致重合,弯矩与转角呈线性关系。在转角大致为 0.008 rad 时,弯矩-转角曲线斜率开始逐渐减小,表明试件已经进入弹塑性阶段。而此时 LPF-1 及 LPF-2 试件曲线依旧重合,但 LPF-3 试件弯矩-转角曲线与另两条曲线发生分离。随后,弯矩随着转角的发展不断增加,但速率逐渐减小,LPF-3 试件的弯矩-转角曲线与另两条曲线差距不断增大。

加载后期,LPF-1 与 LPF-2 试件的承载力依旧相近,说明二者的 L 型件形式对节点承载力没有明显的影响,而 LPF-3 试件的承载力明显低于前两者,表明 LPF-3 试件的 L 型件形式不利于提高节点承载力。

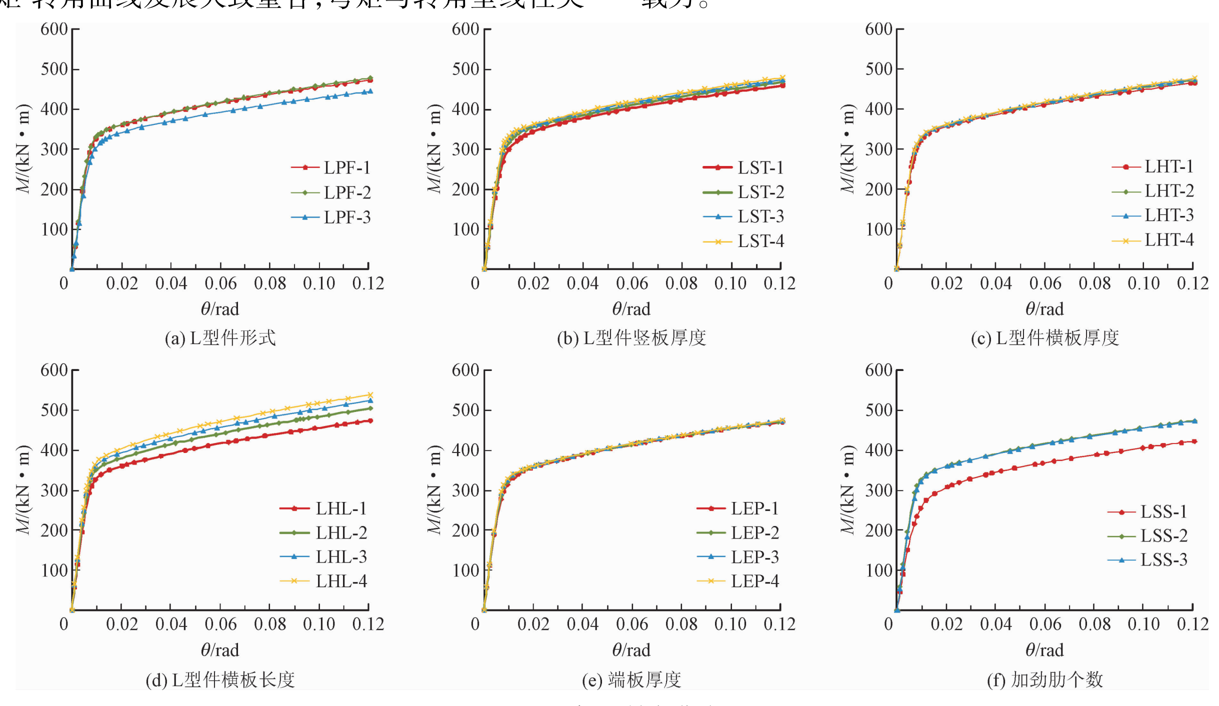


图 9　弯矩-转角曲线

Fig. 9　*M*-*θ* curves

LST 系列试件在转角大致为 0.007 rad 时,弯矩-转角曲线的斜率逐渐减小,此刻开始 4 个试件的曲线开始出现分离趋势,其中 LST-1 试件的弯矩-转角曲线的分离趋势最为明显且该试件曲线斜率减小的速率最快。在此之后,各试件的弯矩-转角曲线的斜率不断减小最终斜率趋于 0。由 4 个试件的弯矩-转角曲线对比可知,从 LST-4 试件至 LST-2 试件,承载力逐渐减小,但此 3 个试件的承载能力差别不甚明显。而 LST-1 试件的 L 型件竖板厚度过薄,导致 L 型件刚度过低且变形加大,从而使得节点域强度差,节点整体承载力较差。

LHT 系列试件在转角约为 0.008 rad 时,开始进入弹塑性阶段。当转角大致为 0.06 rad 时,4 条曲线逐渐发生分离,承载力开始出现细微差距。位移加载至最终阶段时,LHT-2、LHT-3、LHT-4 三者的弯矩-转角曲线虽有轻微差距,但几乎重合,而 LHT-1 试件的承载力最低,差距较明显,这是由于 LHT-1 试件的 L 型件横板过薄,使得钢梁提早进入屈服阶段,因此在加载后期相同外力作用下,L 型件贡献不足,钢梁较早进入塑性阶段,无法承受更多荷载。

LHL 系列试件在转角约为 0.009 rad 时,弯矩-转角曲线的斜率逐渐减小,开始进入弹塑性阶段,且 4 个曲线出现分离现象,曲线差距随着加载过程不断增大,LHL-1 试件的弯矩-转角曲线与其他 3 个试件的差距最为明显。4 个试件的承载力呈现出较大差距,但差距随着 L 型件横板长度的增加逐渐减小,

其中LHL-1试件的承载力最低,LHL-2试件的承载力次之,其次是LHL-3试件,而LHL-4试件的承载力最高,这是由于L型件横板的存在相当于增加了钢梁翼缘的厚度,从而提高了钢梁节点域范围内的刚度及承载力,加长了L型件横板长度,就增加了节点域范围,从而使得刚度大承载力高的区域加大,节点便能承受更高的荷载。

LEP系列试件的4条曲线在位移加载全程几乎完全重合,未出现明显差距,说明改变端板厚度对节点承载力以及刚度均无显著提高。

LSS-2及LSS-3试件的弯矩-转角曲线几乎重合,而LSS-1试件的弯矩-转角曲线与另两条曲线出现分离现象,且差距随着位移加载不断扩大。3条曲线均在转角约为0.008 rad时斜率减小,表明试件已经进入弹塑性阶段。加载后期,LSS-2与LSS-3试件的承载力依旧相近,说明单加腋或双加腋对节点承载力没有明显的影响,而LSS-1试件的承载力明显低于前两者,表明若L型件无加劲肋,则会严重降低节点的承载能力。

2.3 力学性能指标

参数变化时节点的屈服承载力、极限承载力以及转动刚度列于表3,并将参数变化后的力学性能指标与Base试件做了对比。

LPF-2试件的屈服承载力、极限承载力较LPF-1试件均有提高但不明显,但其初始转动刚度有显著提高,LPF-2的L型件形式为横竖板等长,对梁柱翼缘的加厚效果最大,试件加载初期L型件对节点刚度贡献最大,因此对初始抗弯刚度提高作用明显。而LPF-3试件的屈服承载力、极限承载力及初始转动刚度较LPF-1试件出现了显著的降低,分别降低了7.09%、5.84%、6.53%。以上结果表明,LPF-3试件的L型件形式会降低节点的承载力及初始刚度,因为L型件横板的存在等同增加了梁翼缘厚度,由此钢梁的刚度得以增加,节点的L型件横板长度相对短,对钢梁承载能力及初始刚度的贡献较低,节点塑性铰外移不甚明显。

LST系列各试件中LST-2、LST-3(Base)及LST-4的屈服承载力及极限承载力大致相同,LST-1试件的屈服承载力及极限承载力最低,且与其余三者相差较大,这是由于LST-1试件的L型件竖板厚度较小,L型件刚度较差,导致节点强度明显降低,加载过程中提前进入屈服阶段。经对比LST系列各试件的初始抗弯刚度可知,LST-1、LST-2、LST-3及LST-4试件的初始抗弯刚度随着L型件竖板厚度的增加逐渐增大且增幅基本一致,说明增加L型件竖板厚度相当于增加了钢柱翼缘厚度,从而提高了该节点的刚度。

LHT系列试件中LHT-2、LHT-3及LHT-4的屈服承载力及极限承载力大致相同,LHT-1试件的屈服承载力及极限承载力最低,且与其余三者有轻微差距,这是由于LHT-1试件的L型件横板厚度较小,刚度差,强度低,对节点承载力的贡献不足。将4个试件初始抗弯刚度进行对比发现,LHT-2与LHT-3试件的初始抗弯刚度几乎相似,LHT-1试件的初始抗弯刚度最小,LHT-4试件的最大。这是由于增加L型件横板厚度相当于加厚钢梁翼缘厚度,从而提高钢梁的强度与刚度,而LHT-1试件的L型件横板太薄,LHT-4试件的L型件横板过厚,因此会分别对初始抗弯刚度有降低或提高作用。综上,LHT-2、LHT-3试件的力学性能大致相同,LHT-4试件虽初始抗弯刚度略有提高,但作用不大,LHT-1试件的承载力及初始抗弯刚度略低。LHL系列各试件的屈服承载力差距明显,且随着L型件横板长度的增加有所提高,较LHL-1试件的提高幅度逐渐减小,分别为6.88%、9.93%、12.43%。LHL系列各试件的极限承载力差距同样明显,且随着L型件横板长度的增加有所提高,较LHL-1试件的提高幅度逐渐减小,分别为6.69%、10.78%、13.83%。这4个试件的初始抗弯刚度变化规律与承载力变化规律大致相同,分别为8.48%、12.35%、15.64%,3种力学性能中,初始抗弯刚度的提升最为明显。力学性能显著提升时由于L型件横板的存在相当于增加了钢梁翼缘的厚度,从而提高了钢梁节点域范围内的刚度及承载力,加长了L型件横板长度,就增加了节点域范围,使得刚度大承载力高的区域加大,节点便能承受更高的荷载、产生更大的初始抗弯刚度。综上所述,加长L型件横板长度明显提高节点的承载力及刚度,更好的实现"强柱弱梁"的设计原则。

LEP系列各试件中LEP-2、LEP-3及LEP-4的3项力学性能几乎相同,LEP-1试件的屈服承载力、极限承载力及初始转动刚度最低,且与其余三者有轻微差距,分别较Base试件降低了2.13%、1.54%、2.71%,LEP-1试件的端板厚度过小,刚度差,强度低,变形量大,对节点承载力的贡献不足,使得加载初期端板便产生轻微变形,相对其他试件提前进入

屈服阶段。综上,LEP 系列试件表明无法通过提高端板厚度去改善节点承载力及刚度,但由LEP-1试件的数据可以看出,端板厚度不宜过薄,否则会导致节点承载力及刚度不足。

表 3　各参数变化下试件的力学性能指标

Tab. 3　Mechanical properties of the specimens for each parameter

节点编号	屈服承载力/(kN·m)	屈服承载力变化量/%	极限承载力/(kN·m)	极限承载力变化量/%	转动刚度/(kN·m·rad^{-1})	转动刚度变化量/%
Base 试件	331.68	–	472.81	–	47 602.60	–
LPF-2	336.35	1.41	477.86	1.06	50 032.37	5.10
LPF-3	308.18	-7.09	445.19	-5.84	44 494.58	-6.53
LST-1	301.38	-9.14	460.00	-2.71	44 663.54	-6.17
LST-2	327.26	-1.33	468.33	-0.95	46 637.51	-2.03
LST-4	337.24	1.68	479.71	1.46	49 011.24	2.96
LHT-1	324.62	-2.13	465.51	-1.54	46 346.21	-2.71
LHT-2	328.53	-0.95	471.33	-0.31	47 314.31	-0.61
LHT-4	333.17	0.45	477.36	0.96	48 574.56	2.04
LHL-2	354.51	6.88	504.42	6.69	51 641.18	8.48
LHL-3	364.63	9.93	523.77	10.78	53 481.06	12.35
LHL-4	372.91	12.43	538.18	13.83	55 047.11	15.64
LEP-1	326.12	-2.13	471.23	-0.42	46 643.11	-1.56
LEP-2	328.53	-0.95	471.33	-0.40	47 314.31	-0.14
LEP-4	331.58	0.45	475.14	0.41	48 268.07	1.87
LSS-1	272.88	-17.73	422.86	-10.86	38 019.32	-20.13
LSS-3	331.61	-0.02	473.01	-0.29	44 688.50	-6.12

LSS-2 及 LSS-3 试件的屈服承载力及极限承载力基本一致,而 LSS-3 试件的初始抗弯刚度略低于 LSS-2 试件,这是由于 L 型件在双加腋后,刚度过大,在初始加载过程中无法与钢梁协同变形,因而钢梁在初始阶段于节点域外发生轻微变形,从而导致其不如 LSS-2 试件的初始抗弯刚度高。LSS-1 试件屈服和极限承载力及初始抗弯刚度都显著比LSS-2试件低,对比 LSS-2 试件分别降低了 17.73%、10.86%、20.13%。综上所述,L 型件双加腋对节点承载力和整体刚度并无影响,而 L 型件若无加劲肋,则会大大降低节点承载力及刚度,结合经济性,选择 L 型件单加腋形式更为合理。

2.4　承载力与刚度变化趋势

将表 3 中同一系列试件的不同参数对极限承载力与初始转动刚度的影响程度对比绘制于图 10 中。

随着 L 型件竖板厚度的增加,节点极限承载能力与初始转动刚度均上升,其中初始转动刚度增长更快,说明此参数对初始转动刚度的影响更为显著,L 型件竖板厚度每增加 3 mm,初始转动刚度提升约 4%。极限承载力的上升趋势逐渐变缓,表明增加 L 型件短肢厚度对节点极限承载能力的贡献逐渐降低,L 型件竖板厚度每增加 3 mm,极限承载能力提升约 2%。这是由于 L 型件短肢厚度增加相当于增加相应范围内的钢柱翼缘厚度,提高了该范围内钢柱翼缘的抗弯承载力,因此节点域的初始抗弯刚度及极限承载能力均出现提升现象。

随着 L 型件横板厚度的增加,节点极限承载能力与初始转动刚度均呈上升趋势,其中初始转动刚度增长更快,此参数对初始转动刚度的影响更明显,L 型件横板厚度每增加3 mm,初始转动刚度提升约 2.3%。极限承载力曲线的上升趋势逐渐变缓,表明增加 L 型件横板厚度对节点极限承载力的贡献逐渐降低,L 型件横板厚度每增加 3 mm,极限承载力提升约 1.2%。这是由于增加 L 型件横板厚度相当于增加相应范围内的梁翼缘厚度,因此节点域的刚度提

高,相应范围内的钢梁抗弯承载力提高,则初始转动刚度及极限承载能力出现提升现象,但提升幅度低,说明仅增加L型件横板厚度对节点性能无明显改善。

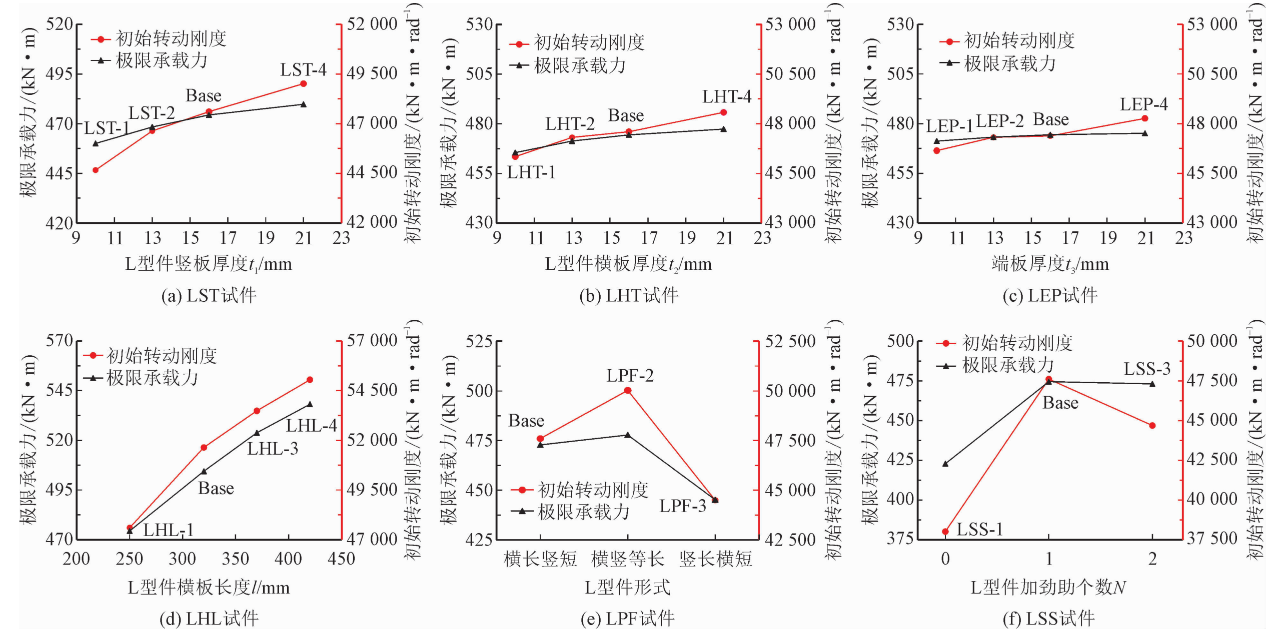


图10 节点参数对极限承载力及初始转动刚度的影响对比

Fig.10 Parameters on the ultimate loading capacity and initial stiffness

随着L型件端板厚度的增加,节点极限承载能力曲线几乎呈直线,说明此参数对节点极限承载能力基本无影响。而初始转动刚度呈上升趋势,说明此参数对初始转动刚度的影响更为显著,端板厚度每增加3 mm,初始抗弯刚度约提升1.8%。增加端板厚度仅会加强节点域刚度,因此节点的初始转动刚度有所提升,但提高幅度不大。

随着L型件横板长度的增加,节点极限承载能力与初始转动刚度均呈上升趋势,且上升趋势较为明显,其中初始转动刚度曲线的斜率更大,说明L型件长肢长度对节点初始转动刚度的影响更明显,L型件长肢长度每增加50 mm,初始抗弯刚度约提升4%,极限承载能力约提升3%。这是由于L型件长肢的存在相当于增加相应范围内的梁翼缘厚度,而这里增加L型件横板长度等同于梁翼缘厚度增加的范围逐渐增大,因此节点域范围增加,使得节点的初始转动刚度及极限承载能力出现显著提高。

当L型件形式为横竖板等长时,极限承载能力及初始抗弯刚度最大,L型件形式为横长竖短时,极限承载能力及初始抗弯刚度较等肢形式略低,当L型件竖长横短时,极限承载能力与初始抗弯刚度显著降低。等肢形式的L型件力学性能最佳。这是由于等长情况下L型件对钢梁钢柱的加强范围均为最大,因此对节点的初始转动刚度及极限承载能力提高效果最大。而L型件形式为竖长横短时,钢梁所受应力不能很好地传递至钢柱,且钢梁的塑性铰距钢柱较近,节点核心区范围最小,因此其初始转动刚度及极限承载能力最低。

当L型件不加腋时,极限承载能力及初始抗弯刚度不足。L型件单加腋时,极限承载能力及初始抗弯刚度最高,此时若继续增加L型件加劲肋数量,极限承载能力与初始抗弯刚度不增反降,这是由于加劲肋过多,使得节点域刚度过大,节点核心区外延应力集中,加速节点破坏。由此可知,L型件单加腋时力学性能最佳。

3 结 论

本研究主要通过有限元法对带顶底L型件的装配式连接节点进行非线性有限元分析,研究该节点在单调静力荷载作用下L型件形式、竖板厚度、横板厚度、横板长度、端板厚度及加劲肋个数对节点破坏模式、应力分布、屈服承载力、极限承载力、初始转动刚度等力学性能的影响规律,得出如下结论。

1)L型件形式的改变导致节点的力学性能有所不同,这主要是因为L型件的横板长度发生变化,使得L型件对梁翼缘抗弯承载力的贡献有所不同。试件设计时应选择横板较长的L型件形式。

2)L 型件竖板厚度增大有助于提升试件的初始刚度,且初始刚度的增幅比例与竖板厚度增幅比例接近;L 型件横板厚度对试件的力学性能影响较小,LHT-4 试件虽初始抗弯刚度略有提高,但作用不大。

3)加长 L 型件横板长度可以明显提高节点的承载力及刚度,更好地实现"强柱弱梁"的设计原则,保证节点既满足承载力要求,又有足够的延性。

4)节点的屈服承载力、极限承载力及初始抗弯刚度与端板的厚度均无明显的相关性,因此,无法通过提高端板厚度来提升节点性能。

5)单加腋或双加腋对节点承载力没有明显的影响,而 L 型件无加劲肋,则会严重降低节点的承载能力。因此,选择 L 型件单加腋形式更合理。

参考文献:

[1] GATES W E, MORDEN M. Professional structural engineering experience related to welded steel moment frames following the Northridge earthquake[J]. The structural design of tall buildings, 1996,5(1):29-44.

[2] 崔鸿超.日本兵库县南部地震震害综述[J].建筑结构学报,1996,17(1):2-13.
CUI Hongchao. A review of earthquake damage in southern Hyogo, Japan[J]. Journal of building structures, 1996, 17(1): 2-13(in Chinese).

[3] 丁克伟,刘建华,马巍,等.新型装配式半刚性节点抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2021,54(4):1-7.
DING Kewei, LIU Jianhua, MA Wei, et al. Experimental study on seismic performances of a new type of fabricated semi-rigid beam-to-column connection[J]. China civil engineering journal, 2021, 54(4):1-7(in Chinese).

[4] 李伟豪,叶茂,章武亮,等.新型节点阻尼器对框架结构静力弹塑性性能的影响[J].应用力学学报,2021,38(4):1596-1603.
LI Weihao, YE Mao, ZHANG Wuliang, et al. Effect of new joint damper on static elasto-plastic performance of frame structures[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2021, 38(4): 1596-1603(in Chinese).

[5] 孟凡涛,张玉明,阮兴群.考虑剪切变形的半刚性连接钢框架 P-Δ 效应研究[J].应用力学学报,2013,30(1):136-140.
MENG Fantao, ZHANG Yuming, RUAN Xingqun. P-Δ effects analysis of steel frame with semi-rigid connection and shear deformation[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2013, 30(1):136-140(in Chinese).

[6] JIANG Z Q, DOU C, ZHANG A L, et al. Experimental study on earthquake-resilient prefabricated cross joints with L-shaped plates[J]. Engineering structures, 2019, 184:74-84.

[7] GUO H C, ZHOU X Z, LI W, et al. Experimental and numerical study on seismic performance of Q690 high-strength steel plate reinforced joints[J]. Thin-walled structures, 2021, 161:107510.

[8] GUO H C, XIE Y, TIAN J B, et al. Seismic behavior of assembled beam-column joints with C-shaped cantilever section[J]. Journal of constructional steel research, 2021, 183:106766.

[9] 叶建峰,郑莲琼,颜桂云,等.装配式可更换耗能铰滞回性能试验研究[J].工程力学,2021,38(8):42-54.
YE Jianfeng, ZHENG Lianqiong, YAN Guiyun, et al. Experimental study on hysteretic performance of replaceable energy-dissipating prefabricated hinges[J]. Engineering mechanics, 2021, 38(8): 42-54(in Chinese).

[10] 舒赣平,周雄亮,王小盾,等.新型装配式钢框架结构建筑体系研究与应用[J].建筑钢结构进展,2021,23(10):26-31.
SHU Ganping, ZHOU Xiongliang, WANG Xiaodun, et al. Research and application of new assembled steel frame structure building systems[J]. Progress in steel building structures, 2021, 23(10): 26-31(in Chinese).

[11] 相阳,罗永峰,黄青隆.装配式钢结构抗震性能研究进展[J].建筑钢结构进展,2019,21(3):1-12.
XIANG Yang, LUO Yongfeng, HUANG Qinglong. Research progress on the seismic performance of prefabricated steel structures [J]. Progress in steel building structures, 2019, 21(3): 1-12(in Chinese).

[12] YIN H, SHI G. Finite element analysis on the seismic behavior of fully prefabricated steel frames[J]. Engineering structures, 2018, 173:28-51.

[13] LIU X C, CUI F Y, ZHAN X X, et al. Seismic performance of bolted connection of H-beam to HSS-column with web end-plate[J]. Journal of constructional steel research, 2019, 156:167-181.

[14] LIU X C, WANG Y, CUI X X, et al. Seismic performance of bolted beam-to-column connection with rib-stiffened splicing plate[J]. Journal of constructional steel research, 2020, 174:106300.

[15] ZHANG A L, GUO Z P, LIU X C. Seismic performance of Z-type cantilever beam splices of column-tree connection[J]. Journal of constructional steel research, 2017, 133:97-111.

[16] 茹继平,杨娜,杨庆山.翼缘削弱型钢框架梁柱节点的性能研究综述[J].工程力学,2004,21(1):61-66.
RU Jiping, YANG Na, YANG Qingshan. A review on the seismic performance of steel moment connections with reduced beam sections[J]. Engineering mechanics, 2004, 21(1): 61-66(in Chinese).

[17] 门亦昂,王新武,余永强,等.装配式钢框架梁柱节点抗震性能研究[J].工业建筑,2020,50(3):156-159.
MEN Yi'ang, WANG Xinwu, YU Yongqiang, et al. Research on seismic behavior of beam-column joints of prefabricated steel frame structures[J]. Industrial construction, 2020, 50(3): 156-159(in Chinese).

[18] 王萌,毕鹏,杨维国,等.设置低屈服点钢材"结构保险丝"的延性钢框架连接节点受力性能研究[J].建筑结构学报,2019,40(11):90-101.
WANG Meng, BI Peng, YANG Weiguo, et al. Study on mechanical behavior of ductile steel frame connection with low yield point steel 'structural fuse'[J]. Journal of building structures, 2019, 40

(11):90-101(in Chinese).

[19] 黄彬辉,李元齐.装配式钢结构梁柱节点承载性能研究进展[J].结构工程师,2021,37(1):228-238.
HUANG Binhui,LI Yuanqi. A review on the bearing performance of beam-column joints of assembled steel structures[J]. Structural engineers,2021,37(1):228-238(in Chinese).

[20] 李国强,段炼,陆烨,等.H型钢梁与矩形钢管柱外伸式端板单向螺栓连接节点承载力试验与理论研究[J].建筑结构学报,2015,36(9):91-100.
LI Guoqiang,DUAN Lian,LU Ye,et al. Experimental and theoretical study of bearing capacity for extended endplate connections between rectangular tubular columns and H-shaped beams with single direction bolts[J]. Journal of building structures,2015,36(9):91-100(in Chinese).

[21] 王萌,孙毅,杨璐.配置低屈服点角钢连接件的钢框架节点损伤控制及优化设计[J].建筑结构学报,2021,42(12):76-89.
WANG Meng,SUN Yi,YANG Lu. Damage control and optimal design of steel frame connection with low yield point angle steel components[J]. Journal of building structures,2021,42(12):76-89(in Chinese).

[22] 陈廷国,任伟宾,曲激婷.RBS节点钢框架设计方法与极限承载力理论研究[J].大连理工大学学报,2020,60(5):499-512.
CHEN Tingguo,REN Weibin,QU Jiting. Design method and ultimate bearing capacity study of steel frame structure with RBS connection[J]. Journal of Dalian University of Technology,2020,60(5):499-512(in Chinese).

[23] 石永久,王萌,王元清.钢框架不同构造形式焊接节点抗震性能分析[J].工程力学,2012,29(7):75-83.
SHI Yongjiu,WANG Meng,WANG Yuanqing. Analysis on seismic behavior of different structural constructions of welded steel frame connections[J]. Engineering mechanics,2012,29(7):75-83(in Chinese).

[24] 李明昊,谭英华,席丰.几种典型钢框架节点连接性能的有限元仿真分析[J].应用力学学报,2020,37(1):301-307.
LI Minghao,TAN Yinghua,XI Feng. Finite element simulation analysis on connections performance of several typical steel frame joints[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(1):301-307(in Chinese).

[25] 杨子仪,叶茂,刘建武,等.新型装配式塑性铰节点的设计及数值模拟[J].应用力学学报,2021,38(4):1423-1430.
YANG Ziyi,YE Mao,LIU Jianwu,et al. Design and numerical simulation of a new assembled plastic hinge joint[J]. Chinese journal of applied mechanics,2021,38(4):1423-1430(in Chinese).

[26] 郝际平,孙晓岭,薛强,等.绿色装配式钢结构建筑体系研究与应用[J].工程力学,2017,34(1):1-13.
HAO Jiping,SUN Xiaoling,XUE Qiang,et al. Research and applications of prefabricated steel structure building systems[J]. Engineering mechanics,2017,34(1):1-13(in Chinese).

[27] 王俊,赵基达,胡宗羽.我国建筑工业化发展现状与思考[J].土木工程学报,2016,49(5):1-8.
WANG Jun,ZHAO Jida,HU Zongyu. Review and thinking on development of building industrialization in China[J]. China civil engineering journal,2016,49(5):1-8(in Chinese).

[28] 刘学春,浦双辉,徐阿新,等.模块化装配式多高层钢结构全螺栓连接节点静力及抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(12):43-51.
LIU Xuechun,PU Shuanghui,XU Axin,et al. Experimental study on static and seismic performance of bolted joint in modularized multi-layer and high-rise prefabricated steel structures[J]. Journal of building structures,2015,36(12):43-51(in Chinese).

[29] 曹正罡,杜鹏,李江东,等.低周往复荷载作用下可变梁高装配式钢框架节点力学性能研究[J].建筑结构学报,2015,36(4):1-8.
CAO Zhenggang,DU Peng,LI Jiangdong,et al. Research on mechanical performance of bolted height adjustable steel beam-to-column connections under low cycle reversed loading[J]. Journal of building structures,2015,36(4):1-8(in Chinese).

[30] 李慎,姚丹,郭宏超,等.带顶底L型件的装配式梁柱节点试验研究[J].地震工程与工程振动,2020,40(5):148-158.
LI Shen,YAO Dan,GUO Hongchao,et al. Experimental study on assembled joint with top and seat L-shaped parts connections[J]. Earthquake engineering and engineering dynamics,2020,40(5):148-158(in Chinese).

(编辑 李坤璐)